

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560072

研究課題名(和文) 2次元周期構造の特性解析とその電磁波素子設計への応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on reflection properties of two-dimensional periodic structure, and its application to the design of electromagnetic devices

研究代表者

横田 光広 (Yokota, Mitsuhiro)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：40191506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：2次元周期構造を多層誘電体スラブ構造でモデル化することについて数値的な観点から検証している。反射率を数値計算法の1つであるFDTD法により求め、同じ反射率を与えるスラブの有効誘電率を計算する。この有効誘電率の有効性や適用範囲を検討している。

まず、1次元周期構造からの反射率をFDTD法により求め、等価な誘電体スラブの有効誘電率を計算した。その結果を用いて2次元周期構造の反射率を検討した。規格化周波数に対する有効誘電率が不連続となったため、この問題点を改善するためにスラブ構造の厚さを薄くして多層化するモデル化を提案した。このことにより、不連続となる欠点を解決し適用範囲を広げることが成功した。

研究成果の概要(英文)：Two-dimensional periodical structure is modeled by the multilayer dielectric slab structure and the validity of the effective permittivity and verification of the scopes have been performed. The reflectance from the periodic structures is calculated by FDTD method. The effective permittivity of the dielectric slab is calculated by using the reflectance obtained by FDTD method.

At first, the reflectance from one-dimensional periodic structure was calculated by the FDTD method. The n , the effective permittivity of the equivalent dielectric slab was examined. The effective permittivity to the normalized frequency became discontinuous, and it turned out that the validity is narrow. In order to improve this discontinuous, the model which makes thickness of slab structure thin and it multilayers has been proposed. This proposal is working well to the structure presented in this research.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・工学基礎

キーワード：周期構造 有効誘電率 数値解析 電磁波素子 周波数フィルタ

1. 研究開始当初の背景

媒質の誘電率や物体が一定の間隔で変化する周期構造は古くから理論的、数值的、実験的に研究が行われている。導波路表面に周期的な凹凸を付けたレリーフ型や媒質の屈折率が周期的に変化する屈折率変調型がマイクロ波や光波領域で用いられている。近年、電磁波の波長程度の周期構造を持ったデバイスとしてフォトニック結晶が注目され、様々な機能性を持っていることが理論的、数值的、実験的に検証され、多様で画期的な機能性が期待されている。誘電体や金属を周期的に配置した構造はマイクロ波や光波領域において、周波数および偏波フィルタ、入出力素子として利用されている。柱状物体として良く用いられるものに円柱がある。1次元周期構造は、離散的な散乱体で構成される基本的な構造である。この構造を多層化すると2次元周期構造となる。2次元周期構造は、特定の周波数の波が伝搬できないバンドギャップを持つことが知られている。波長、物体の大きさ、周期などが波の散乱特性や導波特性に与える影響について、これまで、フーリエ級数展開法、円筒波関数展開法、有限要素法、微分法、時間領域差分法、時間領域ビーム伝搬法などを用いた研究成果が報告されている。

上記の研究は数值的ではあるが、周期性などの構造の特性を考慮に入れて解析している。一方、物体の構造や誘電率分布が複雑な場合、電磁波から見たときにどのような電気特性を持っているかを調べることは、電磁気学の分野において大変重要である。周波数が非常に低く、多くの物体が不規則(ランダム)に配置された場合、マクスウェル-ガーネット近似により有効誘電率が求められている。国内では、ランダム媒質での有効誘電率に関する研究が九州大学のグループにより行われていた。同グループにより、近年、円柱や球が周期構造から若干ずれた準周期構造に対する有効誘電率が検討され、物体間の距離が十分離れている場合に有効であるが、密に物体が配置された場合は近似の精度が落ちるとの結論が得られている。また、マイクロ波領域において、混合媒質に対する有効誘電率を近似的に求める手法が米国電気電子学会 (IEEE) などでも報告されている。

2. 研究の目的

2次元物体が周期的に配置された構造について、誘電体多層構造でモデル化した場合の適用範囲(周波数や物体の分布率など)を検証することが本研究の目的である。具体的には、以下の点を明らかにする。

- ・2次元柱状物体が周期的に配置された構造を誘電体多層構造でモデリングし、有効誘電率の成立範囲(周波数や物体の分布率など)について検証する。
- ・誘電体多層構造の全体の厚さ、誘電体と空気との厚さ比、層数などを反射・透過

特性の観点から検証する。

3. 研究の方法

2次元柱状物体が周期的に配置された構造をモデリングし、準静電近似の元で求めた有効誘電率の成立範囲(周波数や物体の分布率など)について検証する。周期構造では物体間の共振が大きな特徴となるため、準静電近似の改良について検討を行う。次に、単層周期構造における有効誘電率を数値計算法の1つであるFDTD法により求め、単層周期構造をこの有効誘電率を持つ誘電体スラブ(以降、有効誘電膜と呼ぶ。)に置きかえる。その後、多層周期構造を同じ層数を持つ有効誘電膜で置き換え多層化する。多層周期構造及び多層有効誘電膜の反射特性を比較し、有効誘電率を用いた多層周期構造の近似の有効性と適用範囲について検討する。また、有効誘電率を精度良く求めるために単層の有効誘電膜を多層化する場合について提案する。

4. 研究成果

正方柱周期構造において、有効誘電率をボルン近似及び精度を上げたリトフ近似の解析的な表現式が得られている。これらの表現式を用いて有効誘電率を数值的に検証した結果、物体間の距離が離れている場合や物体の大きさが入射波長に比べて小さい場合においてのみ十分な精度が得られることを確認した。マイクロ波や光波領域で用いられるデバイスのパラメータの観点から、上記の近似は必ずしも有用とは言えない。そこで、オリジナルの周期構造を有効誘電膜で置換し、それぞれの構造からの反射率が一致する有効誘電膜の有効誘電率を数值的に求めることについて、検討を行った。以下では、正方柱及び円柱周期構造の二つの構造について報告する。

(1) 正方柱周期構造の場合

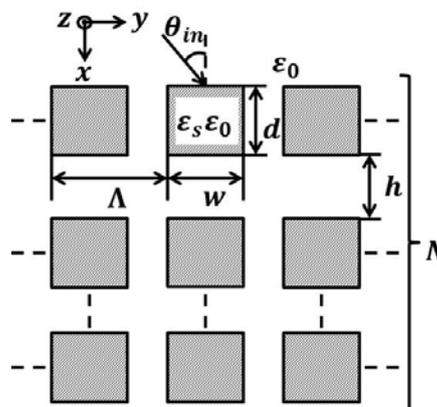


図1. 多層正方柱周期構造

まず、図1に示す正方柱周期構造に対する数値計算結果を示す。Nは周期構造の層数、

$\Lambda=1.0\mu\text{m}$ は周期であり、 $h=0.5\Lambda$ は周期構造の間隔である。また正方柱は $\epsilon_s=2.0$ の比誘電率を持ち、その厚さ及び幅は $d=w=0.5\Lambda$ である。近似層の厚さは正方柱の厚さ d と等しくしている。

図2は $N=1$ の単層周期構造における単層膜近似モデルの有効誘電率である。横軸の Λ/λ_0 は規格化周波数である。この図から単層膜近似モデルの有効誘電率は、規格化周波数 $\Lambda/\lambda_0=0.6$ 付近で不連続となっていることが確認できる。

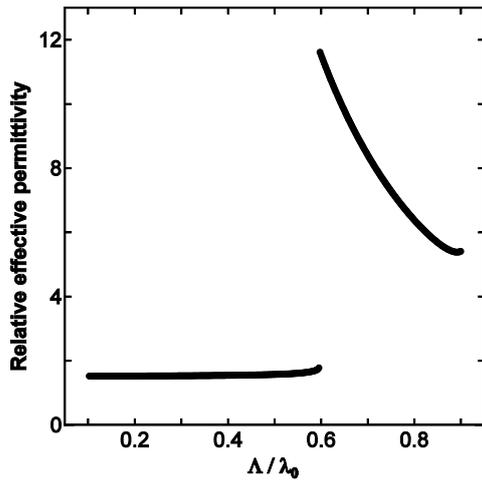


図2. 単層正方柱周期構造に対する単層膜近似モデルの有効誘電率

図2の不連続は、膜厚が厚くなると有効誘電膜中での位相変化が大きくなり、解くべき方程式が激しく変動し、連続的に解を求めることができなくなるためと考える。これを解決するために、図3に示すように薄い厚さを持つ3層膜近似について検討を行った。

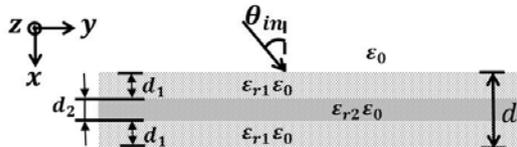


図3. 3層膜近似モデル

図4は $N=1$ の単層周期構造における3層膜近似モデルの内層有効誘電率 $\epsilon_{\text{eff}2}$ を表している。外層の厚さ d_1 と有効誘電率 $\epsilon_{\text{eff}1}$ は両側とも等しくしており、外層有効誘電率は $\epsilon_{\text{eff}2}$ が $\Lambda/\lambda_0 < 0.6$ の低周波域ではほぼ一定となるような値 $\epsilon_{\text{eff}1}=1.476$ に固定している。また外層の厚さ d_1 と内層の厚さ d_2 の比は $d_1:d_2=49:2$ とし、3層膜全体の厚さは正方柱の厚さ d と等しくしている。

$N=5$ の5層正方柱周期構造を単層膜モデル及び3層膜モデルで近似した場合の反射率比較を、それぞれ図5及び図6に示す。FDTD法はオリジナルの5層正方柱周期構造の反射率をFDTD法により求めた結果を表し、 R_{eff} 及び $R_{\text{eff}3}$ はそれぞれ単層膜モデル及び3層膜

近似モデルの反射率を表している。また R_{ave} は図2の単層膜近似モデルでの有効誘電率において、不連続点 $\Lambda/\lambda_0=0.6$ までの有効誘電率の平均値 $\epsilon_{\text{eff}a}=1.5527$ を用いて近似した反射率を表している。図5から単層膜近似モデルの反射率 R_{eff} はその有効誘電率と同様に $\Lambda/\lambda_0=0.6$ 付近で不連続となり、不連続点以下の低周波側では精度よく近似できているが、不連続点を越えた高周波側では近似できていないことが確認できる。平均値を用いた R_{ave} では不連続性が解消され、近似可能範囲が $\Lambda/\lambda_0=0.7$ 程度まで拡大していることが確認できる。また、図6から3層膜近似モデルの反射率 $R_{\text{eff}3}$ は規格化周波数 $\Lambda/\lambda_0=0.8$ 程度まで近似できており、本研究における近似モデルの中では最も良い近似となることが確認できる。これは3層膜で近似したことにより、より複雑な散乱にも対応できるようになったためと考えられる。ここで本研究における近似可能な範囲は、FDTD法に対する差が50%までの範囲としている。

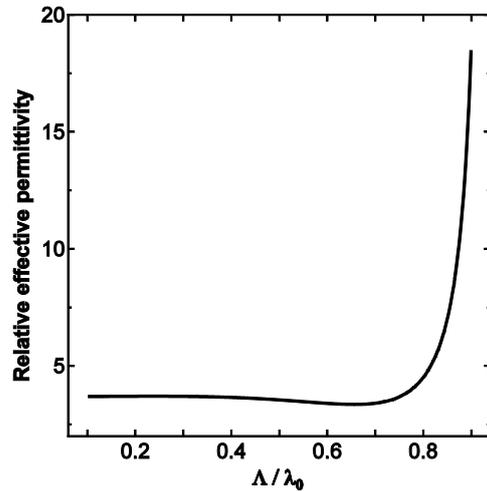


図4. 単層正方柱周期構造に対する3層膜近似モデルの内層有効誘電率

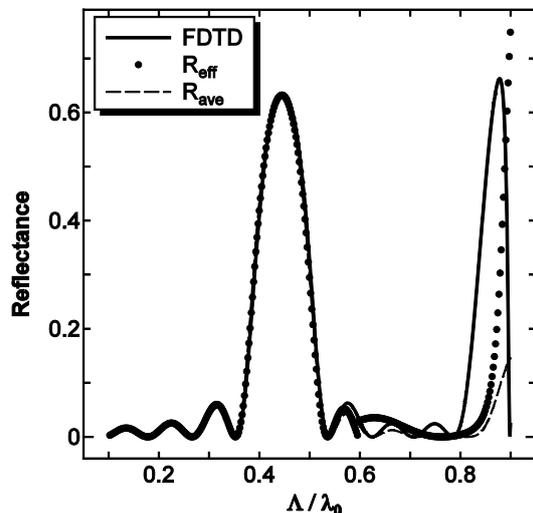


図5. 5層正方柱周期構造に対する

単層膜近似モデルの反射率比較

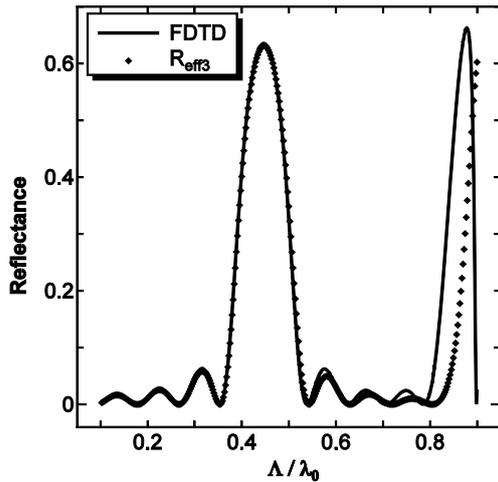


図 6. 5層正方柱周期構造に対する3層膜近似モデルの反射率比較

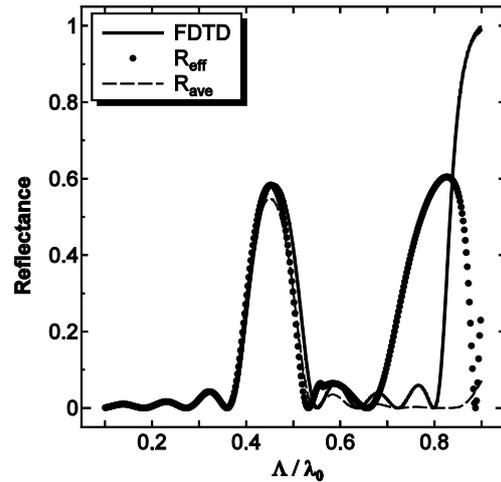


図 8. 5層円柱周期構造に対する単層膜近似モデルの反射率比較

(2) 円柱周期構造の場合

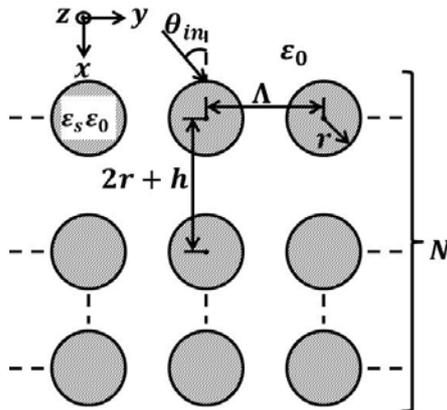


図 7. 多層円柱周期構造

図 7 に示す円柱周期構造に対する数値計算結果を示す。N は周期構造の層数、 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ は周期であり、 $h=0.5\Lambda$ は周期構造の間隔である。また円柱は $\epsilon_s=2.0$ の比誘電率を持ち、その半径は $r=0.25\Lambda$ である。近似層の厚さは円柱の直径 $2r$ と等しくしている。

円柱周期構造の場合においても、規格化周波数に対する有効誘電率は不連続になるため、3層膜近似モデルを用いて改善を図る。

$N=5$ の 5 層円柱周期構造を単層膜モデル及び 3 層膜近似モデルで近似した場合の反射率比較を、それぞれ図 8 及び図 9 に示す。単層膜近似モデルにおける不連続点までの有効誘電率の平均値は $\epsilon_{\text{effa}}=1.4701$ である。

図 8 から単層近似モデルでは、 R_{eff} は不連続点 $\Lambda/\lambda_0=0.57$ まで、 R_{ave} は $\Lambda/\lambda_0=0.6$ 付近まで近似可能であることが確認できる。また図 9 から 3 層近似モデル R_{eff3} は $\Lambda/\lambda_0=0.8$ 付近まで近似可能であり、円柱周期構造においても最も良い近似モデルであることが確認できる。

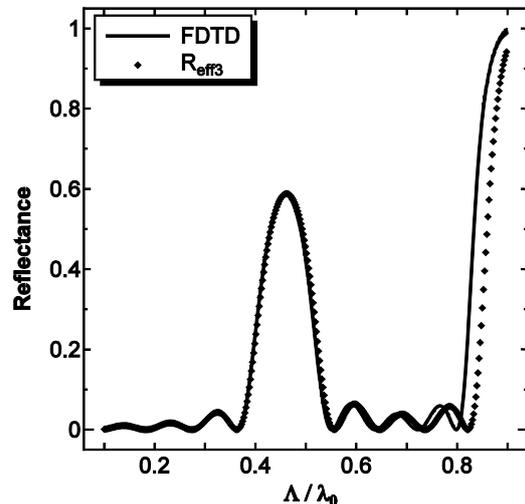


図 9. 5層円柱周期構造に対する3層膜近似モデルの反射率比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 松元和正、溝口大貴、横田光広、多層周期構造における有効誘電率に関する数値的検討、宮崎大学工学部紀要、査読無、第 42 巻、2013、pp.45-48
- ② 横田光広、松元和正、FDTD 法を用いた一元周期構造における有効誘電率に関する検討、宮崎大学工学部紀要、査読無、第 41 巻、2012、pp.135-138
- ③ 横田光広、永田玲矢、二次元共振器付きフォトニック結晶導波路における周波数分離特性に関する数値的検討、電子情報通信学会論文誌 C、査読有、J95-C 巻、2012、pp.231-234

[学会発表] (計 16 件)

- ① 横田光広、松元和正、多層周期構造における有効誘電率の数値的検討、電気学会電磁界理論研究会資料、査読無、EMT-14-81、2014年5月24日、首都大学東京
- ② 溝口大貴、松元和正、横田光広、2次元誘電体円柱の多層周期構造における有効誘電率の数値的検討、電子情報通信学会総合大会、査読無、C-1-12、2014年3月20日、新潟大学
- ③ 松元和正、横田光広、多層周期構造における有効誘電率の有効性に関する数値的検討、電子情報通信学会ソサイエティ大会、査読無、C-1-6、2013年9月20日、福岡工業大学
- ④ K. Matsumoto and M. Yokota, Numerical Examination on Effective Permittivity of Periodic Structure by the FDTD Method, 国際電波科学連合電磁界理論に関する国際シンポジウム (Proc. URSI EMTS 2013)、査読有、946-949、2013年5月24日、広島国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田 光広 (YOKOTA, Mitsuhiro)

宮崎大学・工学教育研究部・教授

研究者番号：40191506